

Le Centre Acoustique de l'École centrale de Lyon

Daniel Juvé et Philippe Blanc-Benon

Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique (UMR5509)
Université de Lyon, CNRS
École Centrale de Lyon
Institut National des Sciences Appliquées de Lyon
Université Claude Bernard Lyon I
69130 Écully
France
Courriel :
daniel.juve@ec-lyon.fr
philippe.blanc-benon@ec-lyon.fr

Résumé

L'équipe de recherche en acoustique de l'École centrale de Lyon a été créée il y a 50 ans par le Professeur Geneviève Comte-Bellot. Dans cet article, nous décrivons la croissance de cette équipe, connue aujourd'hui sous le nom de Centre Acoustique, du début des années 1970 à aujourd'hui. L'évolution des intérêts de recherche et des dispositifs expérimentaux est soulignée, et une sélection de références « historiques » est donnée en fin d'article. Les principaux sujets de recherche actuels sont ensuite répertoriés et complétés d'une liste partielle de références récentes.

Summary

The research team in acoustics at Ecole centrale de Lyon was created 50 years ago by Prof. Geneviève Comte-Bellot. In this paper we describe the growth of this team, known now as the Acoustic Center (or Centre Acoustique in French), from the early 70s to today. The evolution of the research interests and of the experimental facilities are emphasized, and a selection of "historical" references is given at the end of the paper. The main current research topics are listed and completed by a partial list of recent references.

Les premières années (1970-1980)

L'équipe acoustique du Laboratoire de mécanique des fluides et d'acoustique de l'École centrale de Lyon a été créée au tout début des années 1970. Cette création est née de la vision de Geneviève Comte-Bellot, déjà à l'époque experte mondialement reconnue dans l'étude des écoulements turbulents, que la nouvelle discipline issue de l'intersection entre la mécanique des fluides et l'acoustique, ou aéroacoustique, était vouée à un très fort développement, à la fois dans ses aspects fondamentaux et dans ses applications, notamment pour l'industrie aéronautique.

Dans la pratique, la construction d'une soufflerie silencieuse associée à une chambre anéchoïque [1] a rapidement été achevée, ce qui constituait une première en France dans le milieu universitaire. L'installation était complétée par deux chambres réverbérantes couplées destinées à la caractérisation des matériaux acoustiques.

La Fig. 1 montre le plan de l'installation, qui était située en sous-sol pour limiter la transmission des bruits parasites et des vibrations.

Un premier article expérimental [2] apparut très rapidement, dans lequel des corrélations croisées entre les fluctuations de pression à la surface d'un profil d'aile et le champ acoustique lointain ont été utilisées pour la caractérisation du bruit émis.

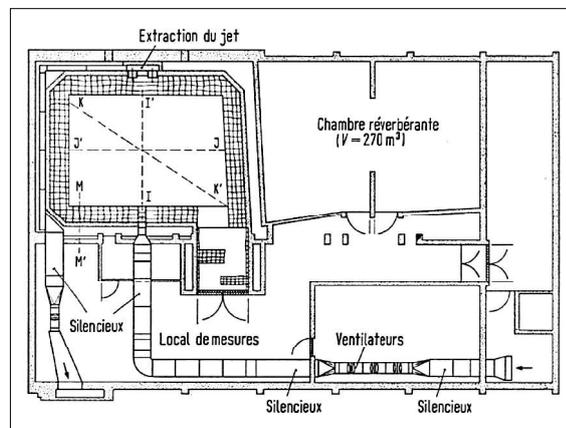


Fig. 1 : Les installations expérimentales au début des années 1970, [1]
The experimental facility in the early 70s, see ref. [1]

Les thèmes de recherche initiaux portaient sur le bruit des ventilateurs et leurs composants de base, profils aérodynamiques ou pales. L'équipe opérationnelle n'était alors constituée que de deux membres, le Professeur Michel Sunyach et un jeune Assistant des Universités, Henri Arbey. Dès 1974, l'installation fut complétée par la construction d'une soufflerie destinée à l'étude du bruit créé par les jets turbulents subsoniques (D. Juvé, [3]).

Les thèmes de recherche se sont rapidement élargis à la diffusion du son par turbulence (D. Juvé-M. Sunyach, 1976), puis à la propagation des ondes sonores de haute fréquence à travers une zone étendue de turbulence cinématique ou thermique (Ph. Blanc-Benon-D. Juvé, 1978 [4]). Enfin, les premières activités de recherche qui étaient centrées sur le bruit de ventilateurs ont été élargies vers l'étude du bruit des compresseurs de moteurs d'avions (M. Roger-H. Arbey, 1980, [5]).

La création du Centre Acoustique (les années 1980)

Très rapidement, les caractéristiques de l'installation initiale se sont révélées trop limitées pour permettre de rendre compte de situations réalistes : nombre de Mach inférieur à 0,4 pour les jets de petit diamètre (diamètre typique de 2cm) et à 0,2 pour l'étude du bruit des profils d'aile dans une section de 30cm x 10cm.

Dès la fin des années 1970, G. Comte-Bellot a recherché les financements indispensables pour créer une installation de classe mondiale, dotée des salles de mesure et des bureaux nécessaires à la croissance de l'équipe. La construction d'un nouveau bâtiment débuta en 1980 et l'inauguration officielle du Centre Acoustique de l'École centrale de Lyon a été effectuée en 1985 à l'occasion de la tenue du colloque IUTAM « Aéro et Hydro-Acoustique », organisé par G. Comte-Bellot et J.E. Ffowcs-Williams.

Une grande chambre anéchoïque (10m x 8m x 8m) a été couplée à une soufflerie permettant d'atteindre un nombre de Mach de 0,5 dans une section de 0,4m x 0,2m. Une deuxième soufflerie alimentait (avec une vitesse moitié) des jets adjacents au jet principal et destinés à favoriser l'émergence du bruit des profils d'aile placés dans le cône à potentiel du jet primaire (Fig. 2). Les caractéristiques détaillées de l'installation sont décrites dans la référence [6]. Un compresseur destiné à alimenter un jet supersonique faisait partie du plan initial mais n'a pas pu être installé en raison d'un financement insuffisant.

Aux études du bruit des ventilateurs, des profils aérodynamiques et des obstacles de formes plus complexes, s'est ajoutée celle de l'excitation des structures par les écoulements : mesure des fluctuations de pression en paroi sous couches limites turbulentes ainsi que des vibrations induites de plaques et, un peu plus tard, de conduits (G. Robert, [7], [8]).

Parallèlement, sous l'impulsion de M. Sunyach, des stratégies actives ont été développées et appliquées à la réduction de bruit se propageant dans les conduits et au contrôle des instabilités de combustion (M-A. Galland, [9], [10], [11]).

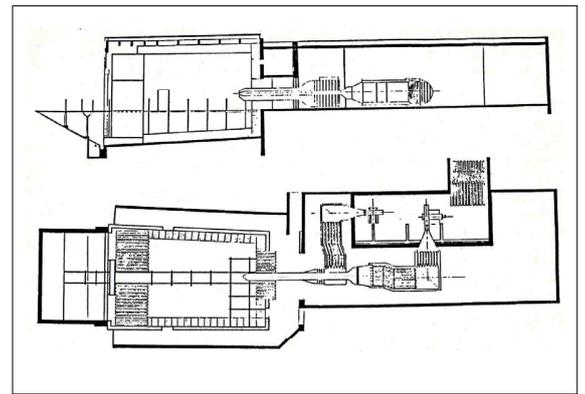


Fig. 2 : Les installations expérimentales au cours des années 1980, [6]
The experimental facility of the Acoustic Center in the 80s, [6]

Le développement de la simulation numérique (1985-2005)

Initialement, les recherches menées au Centre Acoustique étaient essentiellement concentrées sur l'expérimentation et la modélisation théorique. Elles ont été progressivement étendues à la simulation numérique. Les premiers travaux ont porté sur la propagation des ondes acoustiques dans des milieux aléatoires, en utilisant d'abord des techniques de tracé de rayons puis des approximations paraboliques de l'équation des ondes : interaction des ondes acoustiques avec la turbulence cinématique [12], propagation du son dans l'atmosphère [13] et effets non linéaires [14].

Avec l'arrivée de C. Bailly (1995), bientôt rejoint par C. Bogey, l'équipe s'est rapidement tournée vers la simulation de la propagation acoustique dans les écoulements à grande vitesse [15]. Puis la simulation directe de la génération de bruit par des écoulements turbulents a été développée. Cette approche innovante évite l'emploi des modèles analogiques comme celui de Lighthill. Elle est fondée sur la résolution des équations de Navier-Stokes compressibles et sur l'utilisation de schémas de discrétisation spécifiques de haute précision en temps et en espace. Les écoulements étudiés ont d'abord été des jets subsoniques à haut nombre de Mach [16] (Fig. 3, page suivante) et des écoulements de cavités [17]. Les mécanismes de l'émission sonore de jets supersoniques, de profils aérodynamiques et de couches limites turbulentes ont ensuite été analysés par l'équipe à partir de cette même approche.

Les installations actuelles

Si la structure des bâtiments est restée sensiblement la même au fil des ans, les installations expérimentales ont été constamment améliorées pour permettre l'extension des possibilités de recherche.

En 1994, l'installation d'un compresseur centrifuge a permis l'étude de jets supersoniques jusqu'à un nombre de Mach de 1,5, avec des applications pour les secteurs de l'aéronautique et du spatial.

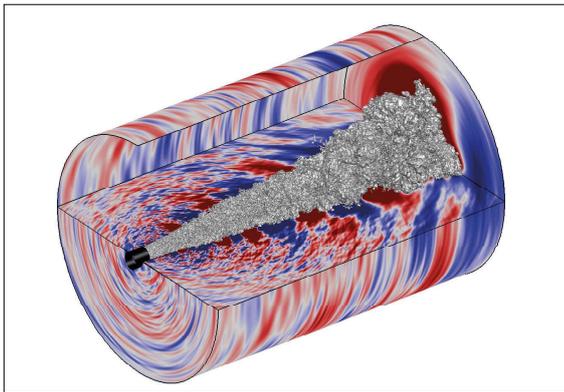


Fig. 3 : Simulation numérique directe du bruit rayonné par un jet subsonique à forts nombres de Mach et de Reynolds (visualisation de la vorticité dans l'écoulement et de la pression acoustique à l'extérieur)
Direct numerical simulation of the vorticity and of the radiated sound pressure of a jet at high Reynolds and Mach numbers



Fig. 5 : La chambre anéchoïque actuelle et les sections de sortie des souffleries subsonique et supersonique
Internal view of the anechoic chamber and of the exhausts of the subsonic and supersonic wind tunnels

Très récemment, le remplacement du revêtement des parois de la chambre anéchoïque et l'installation d'un ventilateur haute pression à deux étages ont permis l'étude du bruit des profils aérodynamiques et des fluctuations de pression sous couches limites turbulentes dans le régime du haut subsonique (le nombre de Mach allant jusqu'à 0,7), pour lequel les effets de compressibilité deviennent importants. L'utilisation conjointe du ventilateur et du compresseur centrifuge permet également d'étudier le bruit créé par des jets coaxiaux, à flux primaire subsonique ou supersonique.

Une vue schématique de la nouvelle installation est donnée sur la figure 4. L'intérieur de la chambre anéchoïque est illustré sur la figure 5, dans laquelle les sections de sortie des souffleries subsonique et supersonique peuvent être distinguées.

D'autres installations complémentaires ont également été récemment mises en service. Pour des études fondamentales, un banc d'essai de ventilateur en conduit à faible Mach a été instrumenté avec de larges réseaux de microphones externes et internes (banc d'essai LP3, illustré sur la figure 6, page suivante).

Un autre banc d'essai permet d'étudier les performances des matériaux passifs ou actifs dans les conduites avec écoulement ($Mach < 0,3$) et sous excitation multimodale.

Une installation destinée à l'étude de la propagation non linéaire des ondes acoustiques a été récemment développée. Des techniques de mesures optiques innovantes (ombroscopie Schlieren et interférométrie Mach-Zehnder) sont utilisées pour caractériser les ondes de choc faibles créées par le claquement d'arcs électriques.

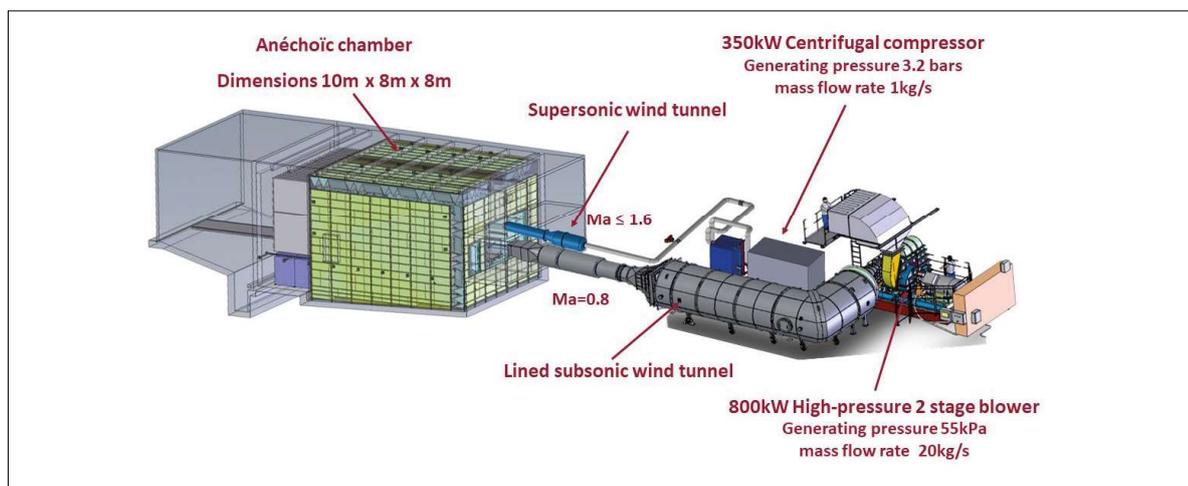


Fig. 4 : Schéma de l'installation principale actuelle : ventilateur haute pression, compresseur, conduits traités acoustiquement et chambre anéchoïque
3D schematic view of the main experimental facility of the Acoustic Center (high-pressure blower and compressor, wind tunnels and anechoic chamber)

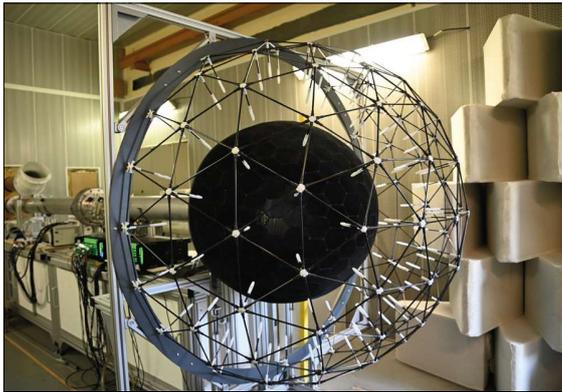


Fig. 6 : Vue partielle du banc LP3, mettant en évidence le réseau externe de 89 microphones (la demi sphère noire est l'écran anti-turbulence (TCS) poreux destiné à régulariser l'écoulement entrant dans la machine
Partial view of the LP3 test bench, with emphasis on the 89 microphone external array. The black half porous sphere is a Turbulent Control Screen (TCS) used to reduce incident fluctuations in the sucked flow

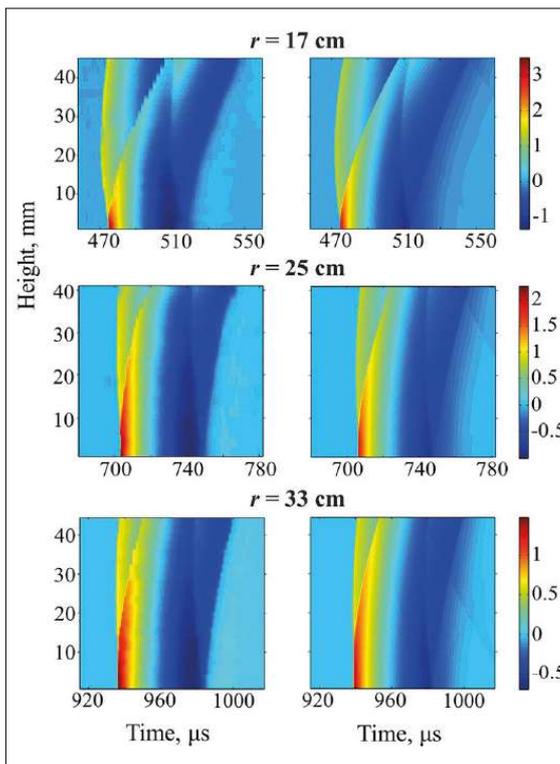


Fig. 7 : Diagrammes de réflexion d'ondes de chocs créées par des arcs électriques. Mesures interférométriques (à gauche) et simulations numériques associées (à droite), [24]
Reflection patterns of spark-generated shock pulses measured by a Mach-Zehnder interferometer (left) and numerically simulated (right), [24]

Cette installation sert notamment à simuler la propagation des bangs soniques dans l'atmosphère et leur interaction avec une topographie de sol complexe ou des bâtiments. Une comparaison entre les mesures et les simulations numériques utilisant des équations d'Euler non linéaires est donnée sur la figure 7.

Sur un plan plus appliqué, l'équipe est fortement impliquée dans les études menées sur le banc d'essai Phare-B2 du LMFA. Cette installation, conçue en partenariat avec Safran Aircraft Engines, reproduit le fonctionnement d'une soufflante aéronautique à l'échelle 1/3 et développe une puissance de 2MW (Fig. 8). Grâce à un environnement anéchoïque, le bruit rayonné à l'extérieur de la machine peut être mesuré et corrélé avec les signaux issus de capteurs situés à l'intérieur de la veine. Les techniques innovantes de traitement d'antennes développées sur le banc LP3 sont ensuite transposées vers cette installation quasi industrielle.

Les collaborations et la philosophie de recherche

Depuis sa création et jusqu'à aujourd'hui, la philosophie du Centre Acoustique a été d'atteindre un équilibre harmonieux entre recherche fondamentale et applications. Le lien avec le milieu industriel a toujours été très étroit, notamment dans le domaine du transport, soit automobile (Renault, Stellantis), ferroviaire (Alstom, SNCF) et bien sûr aéronautique (Dassault, Airbus, Safran) et spatial (CNES, ArianeGroup). Ces liens facilitent l'accès aux sources de financement nécessaires au développement des installations expérimentales, en venant compléter les fonds publics nationaux ou régionaux. Ils constituent également une source de problèmes difficiles et intéressants à traiter, impliquant la recherche d'une schématisation adéquate qui permette de mettre en évidence et d'analyser la physique des phénomènes mis en jeu. La relation très étroite avec Safran a notamment permis la construction de la plateforme Phare (plate-forme de machines tournantes pour la maîtrise des risques environnementaux) ainsi que l'amélioration des performances de la soufflerie anéchoïque grâce à la création de deux chaires industrielles cofinancées avec l'Agence Nationale de la Recherche.

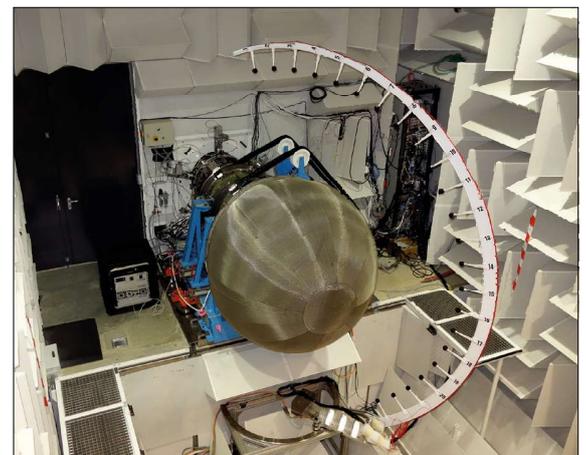


Fig. 8 : Banc d'essais Phare-B2 : vue partielle de la chambre anéchoïque et du réseau externe de microphones (l'entrée du compresseur est masquée par la présence de l'écran de contrôle de la turbulence)
Phare-B2 facility. Partial view of the anechoic chamber and of the external microphone array (the inlet of the compressor is hidden by the TCS)

Outre les nombreuses relations existant au niveau français avec les grands centres de recherche comme l'Onera, l'ISL et le CEA et avec les laboratoires majeurs comme le LAUM, le LMA, Pprime ou l'Institut D'Alembert, de fructueuses collaborations internationales se sont construites au fil des années, avec par exemple les universités de Cambridge, Johns Hopkins, Penn State, Austin ou Moscow State, ainsi qu'avec de nombreuses équipes européennes au travers de participations à des programmes européens dès le tout début des années 1990.

Ces collaborations étroites ont permis l'organisation d'importantes conférences internationales, comme l'EuroMech142 « Acoustique des écoulements turbulents » en 1982, le symposium IUTAM « Aéro- et Hydro-Acoustique » en 1985, plusieurs symposiums sur la propagation du son à longue distance (LRSP 1996, 2008, 2018), un symposium international sur l'acoustique non linéaire (ISNA 2015) et la conférence « Aeroacoustics 2016 » organisée conjointement par le Council of European Aeronautical Societies (CEAS) et l'American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA).

Les collaborations régionales et nationales ont toujours été à l'honneur dans le but de fédérer les forces et les compétences. Dans les années 1980, G. Comte-Bellot est à l'origine d'un groupe de recherche coordonné du CNRS associant des équipes de recherche à Lyon (LMFA et ICPI devenu CPE), Grenoble (Cephag devenu Gipsa-Lab) et Marseille (LMA).

À Lyon, cette volonté de coopération a conduit à la création en 1980 du DEA d'acoustique associant l'École centrale de Lyon à l'INSA et à l'Université Lyon I. Celui-ci s'est transformé en 2018 en un Master International en Acoustique de l'Université de Lyon, enseigné en anglais.

Ce Master s'appuie notamment sur les équipes du Laboratoire d'Excellence CeLyA (Centre Lyonnais d'Acoustique). Créé en 2011, ce Labex est le seul exclusivement dédié à l'acoustique. Dirigé d'abord par D. Juvé, puis depuis 2018 par E. Parizet, il regroupe toutes les principales équipes de recherche lyonnaises et stéphanoises. Il couvre de nombreux domaines allant de l'acoustique physique (vibroacoustique, aéroacoustique, ultrasons), aux applications médicales, à la perception sonore, aux neurosciences et à la bioacoustique. Les équipes et les travaux de CeLyA sont décrits sur le site <https://celya.universite-lyon.fr/>.

Le Centre Acoustique aujourd'hui et demain

Composé de seulement 2 chercheurs en 1973, le Centre Acoustique compte actuellement 21 membres permanents et environ 25 doctorants et post-doctorants. Une photo de groupe prise lors d'un séminaire de l'équipe en 2021 est donnée sur la Figure 9.

168 thèses de doctorat ont été soutenues à ce jour et plus de 400 articles ont paru dans les meilleures revues internationales. La liste complète est disponible sur le site <https://acoustique.ec-lyon.fr/>, où on peut également trouver la majorité des textes des articles et des présentations effectuées lors de conférences.

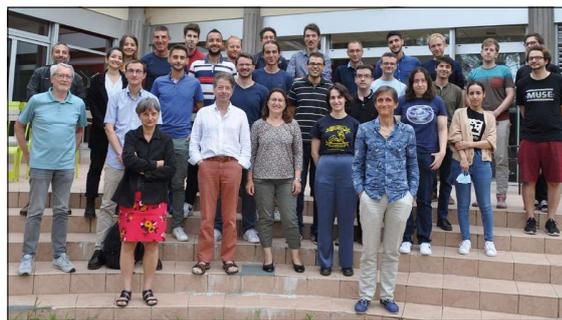


Fig. 9 : Membres du Centre Acoustique lors d'un séminaire de groupe en juillet 2021
Team members at the occasion of a group seminar in July 2021

Nous donnons ci-dessous la liste des principaux thèmes de recherche actuellement traités avec une sélection de références à des publications associées :

- Aéroacoustique des écoulements libres [18], [19].
- Aéroacoustique des profils et des turbomachines [20], [21].
- Champs de pression pariétaux et vibrations des structures induites.
- Propagation acoustique linéaire et non linéaire [24], [25], [26].
- Dynamique des bulles et applications médicales [27], [28].
- Matériaux acoustiques actifs ou passifs sous écoulement rasant [29], [30].
- Méthodes optiques innovantes pour l'acoustique : ombroscopie Schlieren, interférométrie, diffusion Rayleigh [31], [32].
- Traitements d'antennes multimicrophoniques innovants problèmes inverses et reconstitution 3D de champs sonores [33], [34], [35].

Références bibliographiques

Références « historiques »

- [1] Berhault, J. P., Sunyach, M., Arbey, H. et Comte-Bellot, G., Réalisation d'une chambre anéchoïque revêtue de panneaux et destinée à l'étude des bruits d'origine aérodynamique, *Acustica*, 29(2), 69-78, 1973
- [2] Sunyach M., Arbey, H., Robert, D., Bataille, J. and Comte-Bellot, G., Correlations between far field acoustic pressure and flow characteristics for a single airfoil, *AGARD Conf. Proc.* 131, 5.1-5.12, 1974
- [3] Juvé, D., Sunyach, M. and Comte-Bellot, G., Intermittency of the noise emission in subsonic cold jets, *J. Sound Vib.*, 71(3), 319-332, 1980
- [4] Blanc-Benon, P., Chaize, S. and Juvé, D., *Coherence aspects of acoustic wave transmission through a medium with temperature fluctuations*, Springer-Verlag, Berlin, ed. by Comte-Bellot, G. & Ffowcs Williams, J.E., ISBN 978-3-642-82758-7, 217-226, 1986
- [5] Roger, M. et Arbey, H., Relation de dispersion des ondes de pression dans un écoulement tournant, *Acustica*, 59(2), 95-101, 1985
- [6] Sunyach, M., Brunel, B. et Comte-Bellot, G., Performances de la soufflerie anéchoïque à grandes vitesses de l'École centrale de Lyon, *Revue d'Acoustique*, 73, 316-330, 1985
- [7] Robert, G., Modélisation et simulation du champ excitateur induit sur une structure par une couche limite turbulente, thèse de doctorat, ECL 84-02, 1984
- [8] Durant, C., Robert, G., Filippi, P.J.T. and Mattei, P.-O., *Vibroacoustic response of a thin cylindrical shell excited by a turbulent internal flow: comparison between numerical prediction and experimentation*, *J. Sound Vib.*, 229(5), 1115-1155, 2000
- [9] Galland, M.A. et Sunyach, M., Etude d'un système d'absorption active en conduit de longueur finie, *Acustica*, 64, 210-216, 1987
- [10] Billoud, G., Galland, M.A., Huynh Huu, C. and Candel, S., *Adaptive active control of combustion instabilities*, *Combustion Science and Technology*, 81(4-6), 1992

- [11] Furstoss, M., Thenail, D. and Galland, M.A. *Surface impedance control for sound absorption: direct and hybrid passive/active strategies*, *J. Sound Vib.*, 203(2), 219-236, 1997
- [12] Karweit, M., Blanc-Benon, P., Juvé, D. and Comte-Bellot, G., *Simulation of the propagation of an acoustic wave through a turbulent velocity field: a study of phase variance*, *J. Acoust. Soc. Am.*, 89(1), 52-62, 1991, 1991
- [13] Chevret, P., Blanc-Benon, P. and Juvé, D., *A numerical model for sound propagation through a turbulent atmosphere near the ground*, *J. Acoust. Soc. Am.*, 100(6), 3587-3599, 1996
- [14] Blanc-Benon, P., Lipkens, B., Dallois, L., Hamilton, M.F. and Blackstock, D.T., *Propagation of finite amplitude sound through turbulence: Modeling with geometrical acoustics and the parabolic equation*, *J. Acoust. Soc. Am.*, 111(1), 487-498, 2002
- [15] Bailly, C. and Juvé, D., *Numerical solution of acoustic propagation problems using linearized Euler equations*, *AIAA Journal*. 38(1), 22-29, 2000
- [16] Bogey, C., Bailly, C. and Juvé, D., "Noise investigation of a high subsonic, moderate Reynolds number jet using a compressible LES", *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 16(4), 273-297, 2003
- [17] Gloerfelt, X., Bailly, C. and Juvé, D., *Direct computation of the noise radiated by a subsonic cavity flow and application of integral methods*, *J. Sound Vib.*, 266(1), 119-146, 2003

Références récentes

- [18] Pineau P. and Bogey, C., *Numerical investigation of wave steepening and shock coalescence near a cold Mach 3 jet*, *J. Acoust. Soc. Am.*, 149(1), 357-370, 2021
- [19] Varé, M. and Bogey, C., *Flow and acoustic fields of rocket jets impinging on a perforated plate*, *AIAA Journal*, 60(8), 4614-4627, 2022
- [20] Lewis, D., de Laborderie, J., Sanjosé, M., Moreau, S. and Jacob, M.C., *Parametric study on state-of-the-art analytical models for fan broadband interaction noise predictions*, *J. Sound. Vib.*, 514, 116423, 1-28, 2021
- [21] Al-Am, J., Clair, V., Giauque, A., Boudet, J. and Gea-Aguilera, F., *Aeroacoustic analysis of the tip-leakage flow of an Ultra High Bypass Ratio fan stage*, *Physics of Fluids*, 35, 047104, 1-18, 2023
- [22] Prigent, L.S., Salze, E. and Bailly, C., *Deconvolution of the wavenumber - frequency spectra of wall pressure fluctuations*, *AIAA Journal*, 58(1), 164-17, 2202
- [23] Prigent, S.L., Salze, E., Jondeau, E. and Bailly, C., *Spatial structure and wavenumber filtering of wall pressure fluctuations on a fullscale cockpit model*, *Experiments in Fluids*, 61:201, 1-14, 2020
- [24] Karzova, M.M., Lechat, T., Ollivier, S., Dragna, D., Yuldashev, P.V., Khokhlova, V.A. and Blanc-Benon, P., *Irregular reflection of spark-generated shock pulses from a rigid surface: Mach-Zehnder interferometry measurements in air*, *J. Acoust. Soc. Am.*, 145(1), 26-35, 2019
- [25] Dragna, D., Emmanuelli, A., Ollivier, S. and Blanc-Benon, P., *Sonic boom reflection over urban areas*, *J. Acoust. Soc. Am.*, 152(6), 3323-3339, 2022
- [26] Sabatini, R., Marsden, O., Bailly, C. and Gainville, O., *Three-dimensional direct numerical simulation of infrasound propagation in the Earth's atmosphere*, *Journal of Fluid Mechanics*, 859, 754-789, 2019
- [27] Cleve, S., Guédra, M., Mauger, C., Inserra, C. and Blanc-Benon, P., *Microstreaming induced by acoustically trapped, non-spherically oscillating micro-bubbles*, *J. Fluid Mech.*, 875, 597-621, 2019
- [28] Cleve, S., Inserra, C. and Prentice, P., *Contrast agent microbubble jetting during initial interaction with 200-kHz focused ultrasound*, *Ultrasound in Med. & Biol.*, 45(11), 3075-3080, 2019
- [29] Alomar, A., Dragna, D. and Galland, M.A., *Time-domain simulations of sound propagation in a flow duct with extended-reacting liners*, *J. Sound Vib.*, 507, 116137, 1-24, 2021
- [30] Diab, D., Dragna, D., Salze, E. and Galland, M.A., *Nonlinear broadband time-domain admittance boundary condition for duct acoustics. Application to perforated plate liners*, *J. Sound. Vib.*, 528, 116892, 1-26, 2022
- [31] Mercier, B., Jondeau, E., Castelain, T., Osawa, Y., Bailly, C. and Comte-Bellot, G., *High frequency temperature fluctuation measurements by Rayleigh scattering and constant-voltage cold-wire techniques*, *Experiments in Fluids*, 60:110, 1-14, 2019
- [32] Mercier, B. and Castelain, T., *Dynamic analysis of a Rayleigh scattering setup using synthetic light signals from a modulated LED*, *Review of Scientific Instruments*, 90, 063109, 1-8, 2019
- [33] Leclère, Q., Pereira, A., Finez, A. and Souchotte, P., *Indirect calibration of a large microphone array for in-duct acoustic measurements*, *J. Sound Vib.*, 376, 48-59, 2016

- [34] Lecomte, P., Melon, M. and Simon, L., *Spherical fraction beamforming*, *IEEE/ACM Trans. Audio, Speech, Language Process.*, 28, 2296-3009, 2020
- [35] Pereira, A. and Jacob, M.C., *Modal analysis of in-duct fan broadband noise via an iterative Bayesian inverse approach*, *J. Sound. Vib.*, 520, 116633, 1-27, 2022.

Remerciements

Les auteurs remercient les membres du Centre Acoustique pour leur aide lors de la rédaction de cet article. Ce travail a été réalisé dans le cadre du Labex CeLyA de l'Université de Lyon, programme Investissements d'Avenir (ANR-10-LABX-0060/ANR16-IDEX-0005) opéré par l'Agence Nationale de Recherche (ANR).